

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily

Měření mechanického napětí tenzometry na rámu lehkého vozidla

Measurements of mechanical strain on light vehicle frame by strain gages

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Pavčo**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma: **Měření mechanického napětí tenzometry na rámu lehkého vozidla**
Measurement of mechanical strain on light vehicle frame by strain gages
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Problematickou měření mechanického napětí v materiálu, včetně nástrojů a metod, které se k tomuto účelu v současnosti používají.

Popište nejpoužívanější typy tenzometrů včetně porovnání jejich vlastností a použití.

Vytvořte model vetknutého nosníku s odporovými tenzometry včetně jejich instalace na měřený objekt a proveďte měření mechanického napětí. Výsledek ověřte výpočtem.

Proveďte měření mechanického napětí na vybraných částech sportovního automobilu.

Zhodnoťte výsledky dosažené pomocí měření s odporovými tenzometry a navrhnete další směr řešení pro měření na vozidle i za provozu s ohledem na rušení měřeného signálu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Němec, J. Odporové tenzometry v praxi. SNTL, Praha 1967

Hoffman, K. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989

Sensorland. How they work, 2000. Sensorland. <http://www.sensorland.com/HowPage002.html>

HRUBANT, L. Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách.

AUTOMA, 2004, vol. 7/04, no. 7, p. 27–30.

MICRO - MEASUREMENT Noise Control in Strain Gage Measurements. Intertechnology. http://www.intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-501.pdf.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Juránek, Ph.D.**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015

ABSTRAKT

Měření mechanického napětí tenzometry na rámu lehkého vozidla

Práce se zabývá tenzometrickým měřením. Věnuje se základním principům tenzometrického měření a problémy, které mohou při měření nastat. Jsou rozebrány druhy tenzometrů, způsoby jejich aplikace a odvozeny základní úlohy pro běžné způsoby namáhání.

Klíčová slova: tenzometr, povrchová deformace, elektrický odpor, polovodič

ABSTRACT

Measurements of mechanical strain on light vehicle frame by strain gages

This work is engaged in tensometric measuring. This work reports basic principles of tensometric measuring and problems connected with measurements. Different types of tensometers and their applications are described and elemental exercise for common kinds of strain is inferred.

Key words: tensometer, surface deformation, electric resistance, semiconductor

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Ostravě dne 4.5.2015

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Martinu Juránkovi, Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za veškerou podporu během studií.

Obsah

ÚVOD.....	7
1 ZÁKLADNÍ PRINCIP MĚŘENÍ	8
2 PARAZITNÍ VLIVY	11
3 ROZDĚLENÍ TENZOMETRŮ	14
3.1 Odporové tenzometry.....	14
3.2 Polovodičové tenzometry	17
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	22
4.1 Příprava tenzometru před nalepením.....	22
4.2 Příprava materiálu před nalepením	24
4.3 Nalepení tenzometru k materiálu	25
4.4 Pájení drátových vývodů k pájecím svorkám	27
4.5 Vytvoření závěsného ramena.....	28
4.6 Zprovoznění konektoru RJ-50.....	29
4.7 Zapojení drátů do Wheatstonova můstku [14].....	31
4.8 Provedení experimentu.....	33
5 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI EXPERIMENTU	34
5.1 Veličiny pro výpočet	35
6 EXPERIMENT ZATÍŽENÍ RAMÍNKA NA NÁPRAVĚ	37
6.1 Výsledné hodnoty experimentu.....	38
6.2 Výpočet vzdálenosti vnitřního okraje kola od dosedací plochy	39
7 ZÁVĚR.....	42
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	45

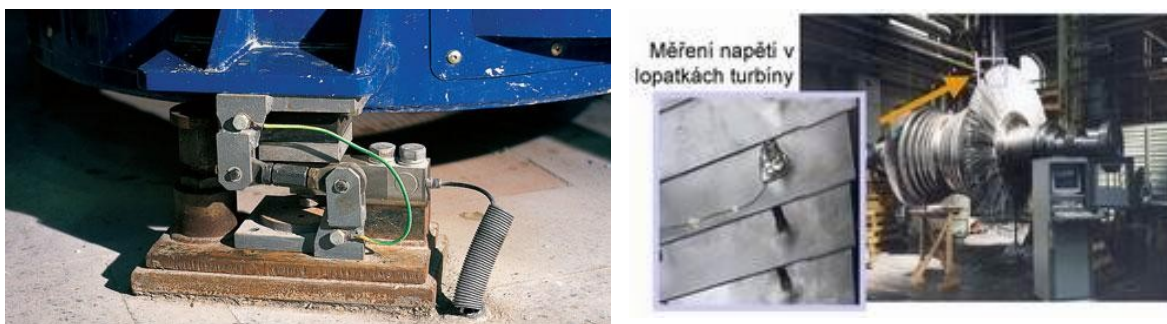
ÚVOD

Při výrobě jakýchkoliv součástek je třeba sledovat jejich kvalitu. Proto je nutná jejich patřičná kontrola, při které je snímáno mnoho údajů. Mimo jiné k nim patří i měření hodnot napětí a deformace, kterých je v dnešní době hojně využíváno, a jsou již v podstatě nepostradatelné pro mnoho oborů lidské činnosti. Ať už se jedná například o konstrukci vázících systémů a siloměrů nebo o analyzování namáhání aut, letadel či mostů.

Je nutné si uvědomit, že napětí nelze stanovit přímo. Například při tahové zkoušce je změřena nejdříve síla, která je následně přepočítána na napětí. U reálné součásti je měřeno přetvoření, které je pak při znalosti materiálových charakteristik přepočítáno na napětí.

Lze si vybrat z širokého spektra možností měření napětí a deformace (např. pomocí tenzometrů, metodou křehkých laků, termoemisní metoda apod.), z něhož je nutné si určit právě tu variantu, která bude pro požadovaný objekt nejefektivnější.

Nejrozšířenější a nejpoužívanější metodou snímání napětí a deformací je tenzometrické měření, které bude v práci podrobněji popsáno a rozebráno.



Obr. 1 Příklady použití tenzometrů [4, 5]

1 ZÁKLADNÍ PRINCIP MĚŘENÍ [1]

Odporové tenzometry pracují na takovém principu, že deformace elektrického vodiče mění jeho elektrický odpor. Vyvolaná změna odporu je snímána a následně je podle ní vyhodnocena deformace měřeného objektu.

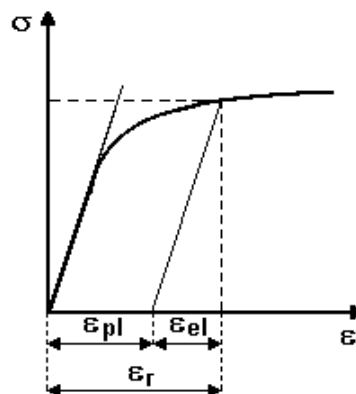
Při natahování či smršťování vodiče v elastické oblasti (ϵ_{el}) deformační křivky (obr. 2) platí Hookův zákon pružné deformace:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1.1)$$

σ mechanické napětí [Pa]

E Youngův modul pružnosti [Pa]

ϵ relativní prodloužení [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]



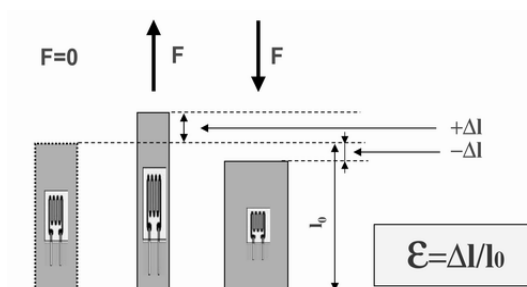
Obr. 2 Deformační křivka [6]

Pro relativní prodloužení vodiče (obr. 3) platí:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

Δl prodloužení vodiče [mm]

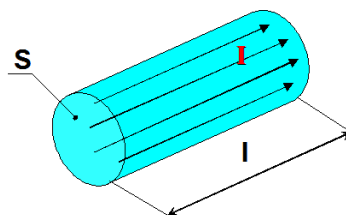
l_0 původní délka vodiče [m]



Obr. 3 Deformace při zatížení [7]

Pro vodič (obr. 4) o průřezu S , délce l s měrným odporem ρ platí, že jeho odpor R je:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.3)$$



Obr. 4 Schéma vodiče [8]

Při zatížení vodiče tahem (tlakem) se zvětší (zmenší) jeho délka l a zmenší (zvětší) se plocha průřezu S , tudíž naroste (poklesne) hodnota odporu R .

Změna odporu je pomocí parciální derivace vyjádřena jako:

$$dR = d\rho \cdot \frac{l_0}{S} + dl \cdot \frac{\rho}{S} - \frac{dS}{S^2} \cdot \rho \cdot l \quad (1.4)$$

Pro poměrnou změnu odporu dR/R pak dosazením vztahů (1.1) a (1.4) platí:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (1.5)$$

Následně pomocí Poissonova čísla μ vyjádřeno:

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \cdot \frac{dl}{l} \quad (1.6)$$

Pro Poissonovo číslo platí:

$$\mu = \frac{\Psi}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

Ψ poměrná deformace v příčném směru [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]

ε poměrná deformace v podélném směru [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]

Po dosazení (1.6) do (1.5) a úpravě je vyjádřen vztah pro relativní změnu odporu jako:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad (1.8)$$

V další úpravě rovnice (1.8) lze výraz v závorce nahradit součinitelem deformační citlivosti k (k-faktorem), protože u pružného přetvoření je to konstanta závislá na změně délky. Výsledný vztah je:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (1.9)$$

K-faktor je závislý na použitém materiálu, který určuje jeho velikost a jeho hodnota je v řádu jednotek až stovek. Obecně lze říci, že čím vyšší je hodnota k-faktoru, tím lepší je citlivost snímače.

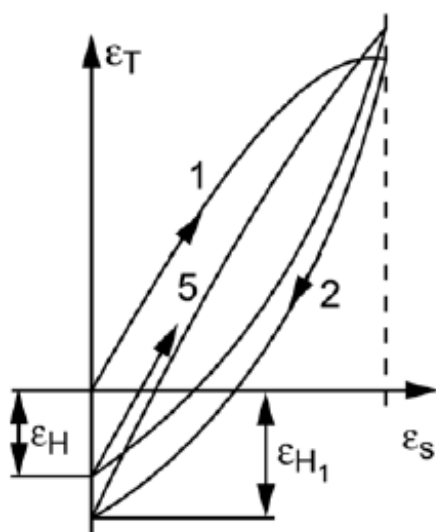
Z rovnice (1.9) vyplývá, že poměrná deformace vodiče je přímo úměrná jeho odporu. Závislost mezi neelektrickou a elektrickou veličinou je lineární. Je-li měřena elastická (pružná) deformace odporovým tenzometrem, je poměrná změna odporu velmi malá, tudíž je nutné její zesílení, ke kterému se např. využívá zapojení do mostu.

2 PARAZITNÍ VLIVY [1,2,3]

Měření se stoprocentní přesností je prakticky nemožné, protože se vždy objeví nějaké parazitní vlivy, jež negativně ovlivňují přesnost měření a způsobují jeho určitou chybu, kterou je třeba minimalizovat. Měření je ovlivněno zejména teplotou, vlhkostí, hysterezí, příčinou citlivostí, nelineární závislosti změny odporu na přetvoření, creepem, vlnovou délkou signálu a únavovým porušením.

Vlhkost může iniciovat chyby při měření, protože vlhkost v okolí tenzometru proniká do podložky a případně i lepidla, čímž dojde ke změně jejich fyzikálních vlastností a v extrémních případech může dojít k odlepování snímače nebo korozi mřížky. Proti vlhkosti je proto třeba využít vhodné ochranné prostředky (např. vosk, lak, čistou vazelínu apod.) a dodržet výrobcem dané pokyny pro správnou aplikaci těchto látek.

Je-li součást zatížena a následně odlehčena, je pozorována závislost mezi deformací součásti ϵ_s a deformací naměřenou tenzometrem ϵ_T . Po odlehčení součásti nenastane návrat do počátečního nulového stavu, ale bude ukazovat nepatrnou deformaci ϵ_{H1} tzv. hysterezi (obr. 5). S rostoucím počtem zátěžových cyklů se hystereze snižuje, až se nakonec ustálí na konstantní hodnotě ϵ_H , proto, pokud je to možné, je dobré zkoušený objekt před začátkem měření několikrát zatížit. Velikost hystereze nezávisí jen na vlastnostech tenzometru, ale také např. na kvalitě podložky nebo upevnění na měřeném objektu. Její obvyklá hodnota je do 0,5% měřené deformace.



Obr. 5 Hystereze [7]

Správnou funkci snímače může ovlivnit jeho příčná citlivost, tedy že dochází k deformaci také ve směru kolmém k ose tenzometru. Součinitel příčné citlivosti q je definován takto:

$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad (2.1)$$

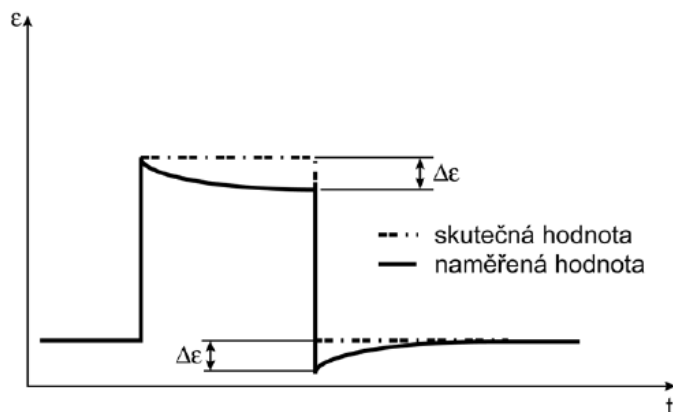
k_t deformační součinitel v příčném směru

k_l deformační součinitel ve směru osy

Hodnota součinitele citlivosti musí být do 0,02, proto se konstruuje snímače s co nejmenší šířkou. Lze ji také snížit zvětšením průřezu mřížky v příčném směru zejména na koncích jednotlivých smyček, čímž dojde ke koncentraci příčného přetvoření na malém prostoru a není jím ovlivněn celý sensor.

Nepřesnost při měření nastává také díky tomu, že závislost poměrné změny odporu na deformaci není zcela lineární. Maximální odchylka od linearit je ale velice malá, hodnota relativní chyby bývá menší než 0,1%.

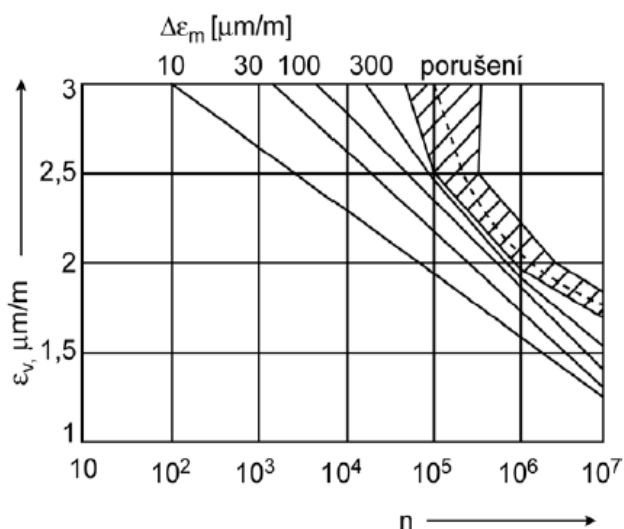
Je-li součást dlouhodoběji statisticky zatížena konstantní silou, začne se u ní projevovat tzv. creep (tečení), protože vlivem dlouhodobého zatížení dojde ke změně vlastností součástí tenzometru, což způsobí prokluz mezi měřicí mřížkou a měřeným tělesem, takže není snímána skutečná deformace povrchu. Po určitém čase dochází k poklesu měřené deformace, čímž dojde k odchylce od skutečné hodnoty deformace (obr. 6). Tento efekt působí vždy v opačném smyslu než je deformace součástí a za určitý čas po odlehčení vymizí. Lze ho kompenzovat využitím elastického efektu s přesně opačným průběhem jako má creep, což je ale v praxi těžko realizovatelné, nebo použitím snímačů, které jsou zkonstruovány tak, aby u nich creep nevznikal.



Obr. 6 Vliv creepu na měření [7]

Při měření rychlých dynamických dějů nebo rázů může nastat situace, že přetvoření součásti má tak krátkou vlnovou délku, že tenzometr nedokáže rozeznat jednotlivé vlny a udává pouze jejich zdánlivou střední hodnotu. Aby k tomu nedocházelo, je třeba, aby poměr aktivní délky tenzometru a vlnové délky měřené podélné vlny byl co nejmenší. Toho lze dosáhnout minimalizací aktivní délky tenzometru. Pro měření rázů se proto používají tenzometry, které mají měřicí mřížku maximálně 3-6 mm dlouhou.

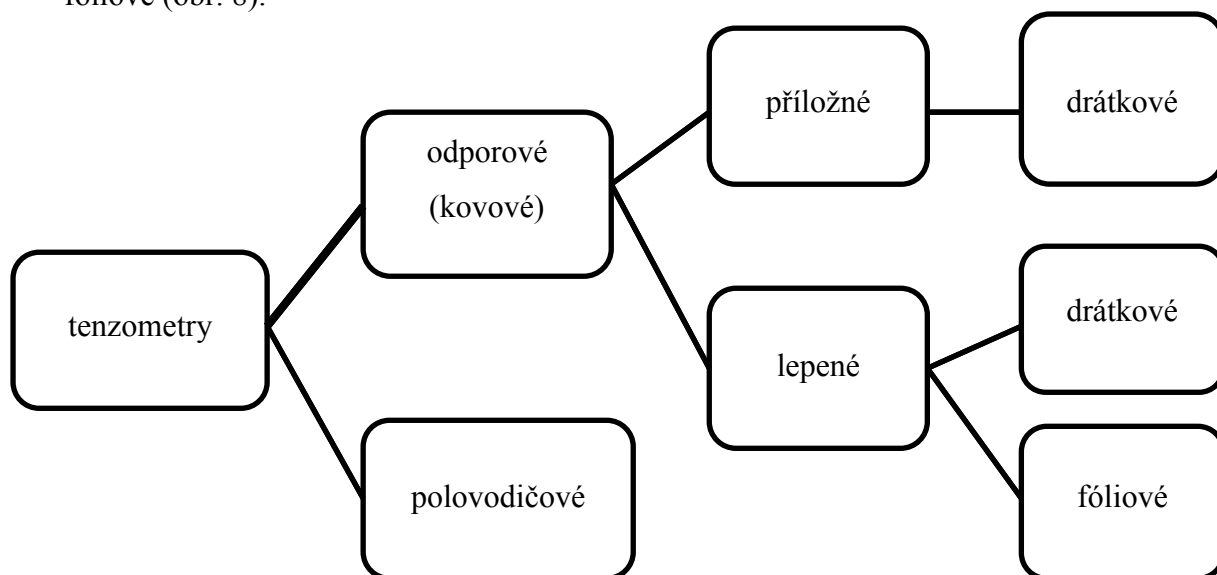
Je-li tenzometr cyklicky zatěžován, projeví se u něj, tak jako u všech součástí, únavové porušení. Tento problém se projevuje zejména v měřicí mřížce, protože její tuhost je řádově menší než je tuhost podložky. Únava zapříčiní vznik mikroskopických trhlin na hranicích zrn v materiálu mřížky, což způsobí špatnou indikaci amplitudy zatěžující síly důsledkem posuvu nulového bodu. Výrobci uvádějí graf závislosti posuvu nulového bodu $\Delta\varepsilon_v$ vzhledem k amplitudě přetvoření střídavého cyklu $\Delta\varepsilon_m$ na počtu cyklů n (obr. 7). Experimentálně bylo zjištěno, že snímače s delší mřížkou lépe odolávají vlivům únavového porušení.



Obr. 7 Graf únavy cyklickým zatěžováním [7]

3 ROZDĚLENÍ TENZOMETRŮ [1]

Dle použitého materialu měřicí mřížky jsou děleny tenzometry na odporové (kovové) a polovodičové. Dle konstrukce se dále rozdělují odporové tenzometry na příložné a lepené. Podle způsobu provedení měřicí mřížky jsou odporové tenzometry děleny na drátkové a fóliové (obr. 8).



Obr. 8 Rozdělení tenzometrů

3.1 Odporové tenzometry [9]

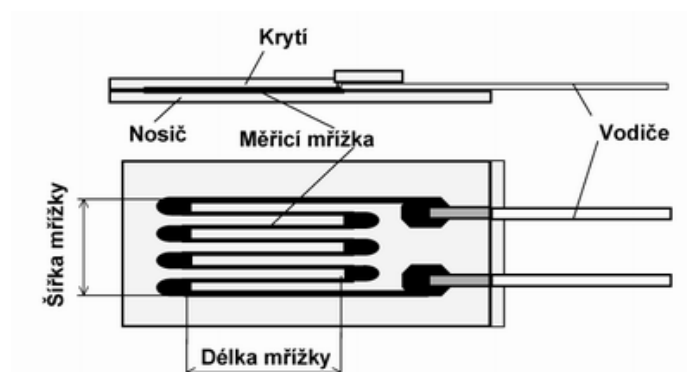
Základem odporových tenzometrů je vodivá mřížka vyrobená z kovových materiálů, jejichž příklady a základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1 Vlastnosti materiálů používaných pro odporové tenzometry [3]

Materiál	Složení [%]	Měrná hmotnost při 20°C [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Měrný odpor při 20°C [μΩm]	Součinitel deformační citlivosti [-]
Manganin	84 Cu + 12 Mn + 4 Ni	8,5	100	0,45	0,47
Konstantan	60 Cu + 40 Ni	8,9	600	0,49	2,05
Nichrom	80 Ni + 20 Cr	8,2	100	1,08	2,2
Platina	100 Pt	21,4	350	0,106	6,0
Nikl	100 Ni	8,85	850	0,087	-12,1

Příložné kovové tenzometry jsou snímače, kde jsou mezi soustavu držáků uchyceny odporové drátky. K měřenému tělesu není přilepen aktivní odporový článek, takže nenastávají problémy, že není přenesena deformace na povrch celého snímače. Výhodou je jejich možné použití za vyšších teplot, malá hystereze a malý posun nulového bodu. Nicméně nevýhodou je, že dosažení tepelné rovnováhy je poměrně zdoluhavé a že mají vysoké nároky na mechanické provedení, takže jsou málo využívány. Navíc lepené tenzometry mají nižší pořizovací náklady, zejména díky jejich masové výrobě. Příložné tenzometry však nacházejí uplatnění jako snímače pro měření tlaku, tahu, zrychlení, apod.

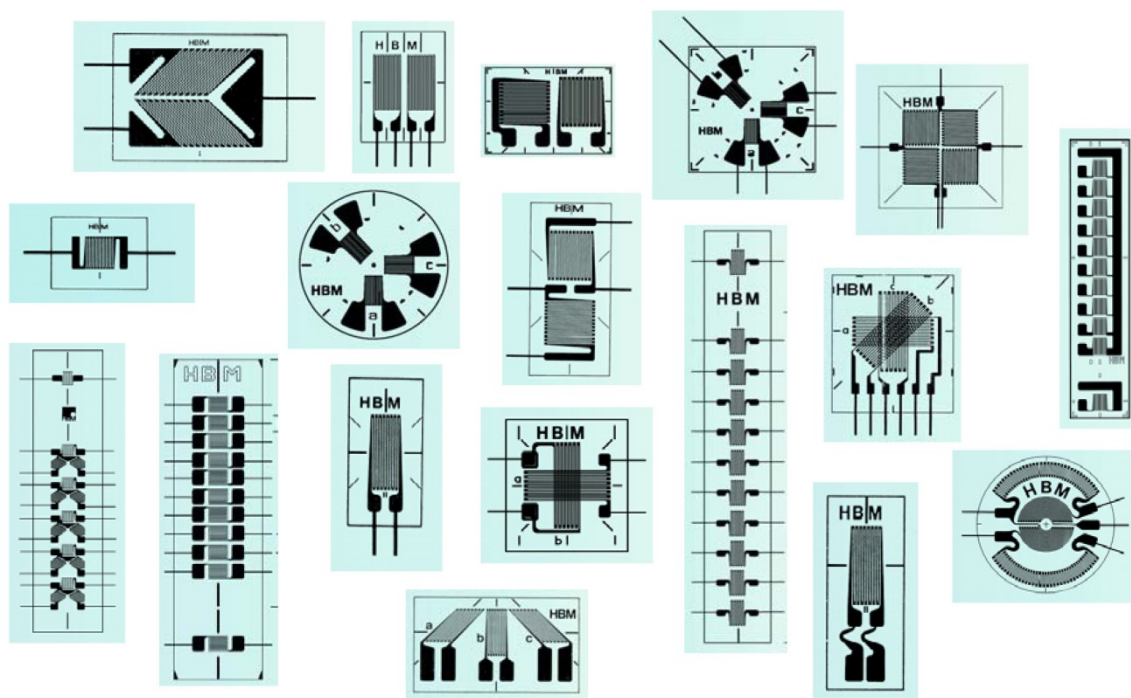
U lepených tenzometrů (obr. 9) je měřicí mřížka přilepena na podložku (vyrobenou z papíru, plastické hmoty nebo z kovu), která je připevněna na měřenou součást. V současnosti bývá navíc mřížka překryta izolační fólií, čímž je dosaženo vyšší odolnosti snímače vůči mechanickému poškození.



Obr. 9 Provedení lepeného tenzometru [5]

Mřížka drátkových lepených tenzometrů je vyrobena z tenkého odporového drátku kruhového průřezu s průměrem 5 až 25 μm , který je uspořádán do tvaru meandru (mnohonásobné vlásenky). Ke koncům drátku bývají připájeny silnější vývody, které slouží pro zapojení do měřicího systému.

Fóliové lepené tenzometry (obr. 10) mají mřížku s obdélníkovým průřezem, přičemž se tloušťka fólie pohybuje v rozmezí od 1 do 10 μm . Tvar mřížky je vyráběn buď leptáním, nebo fotochemicky, kdy na kovovou vrstvu je nanášena fotocitlivá maska, která je následně exponována a neexponované části jsou odstraněny. Díky technologii výroby lze dosáhnout prakticky jakéhokoli tvaru mřížky s přesným geometrickým uspořádáním.

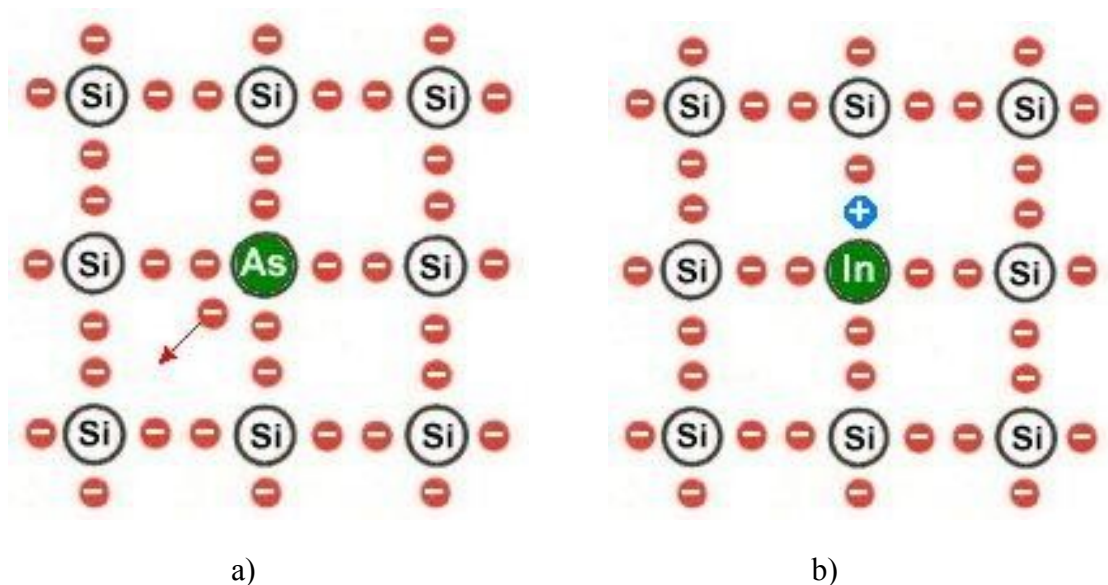


Obr. 10 Základní typy fóliových tenzometrů [5]

Díky konstrukci je u fóliových tenzometrů lepší odvod tepla než u drátkových, takže je možné použití větší proudové zátěže, čímž je dosaženo větších výstupních hodnot. Mají také lepší mechanickou stabilitu, tudíž i vyšší přesnost měření.

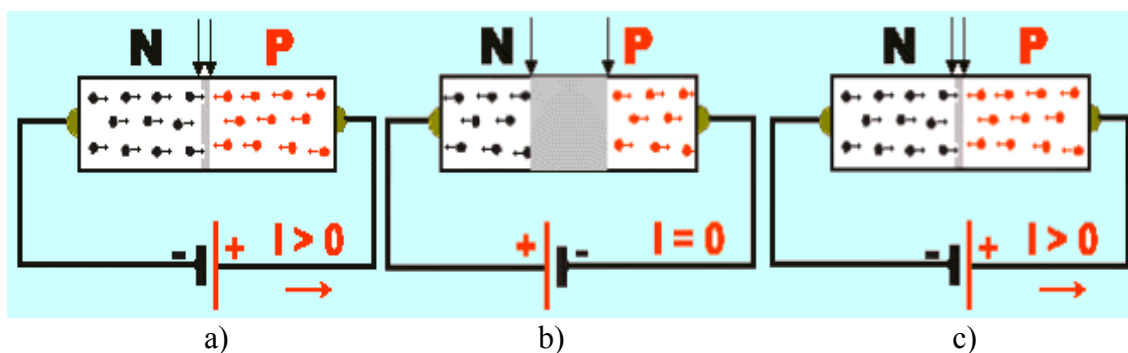
3.2 Polovodičové tenzometry [11, 12]

Polovodiče jsou látky, které mají při pokojové teplotě měrný odpor vyšší než je odpor vodiče, ale menší než odpor izolantu. Mají schopnost výrazně měnit vodivost a to vlivem fyzikálních jevů nebo přidáním příměsí do základního materiálu. Podle typu příměsí může být nosičem náboje elektron nebo díra, podle čehož je rozlišována vodivost typu N (negativní) a P (pozitivní). Vodivost typu N (obr. 11a) je způsobena příměsí pětimocného prvku do základního čtyřmocného materiálu, přičemž čtyři valenční elektrony příměsi se podílejí na vazbě se základním materiálem a pátý elektron se na vazbě podílet nemůže. Je vázán malou silou, a již při nízkých teplotách se stane volným nosičem elektrického proudu. U typu P (obr. 11b) je příměsí trojmocný materiál, takže při vazbě s čtyřmocným materiálem vzniká kladně nabitá díra, která může být nahrazena elektronem z jiné vazby, takže se přesune na jiné místo a vyvolá tzv. děrovou vodivost.



Obr. 11 Krystalová mřížka polovodiče [11]

Při kombinaci polovodičů s opačnou vodivostí vzniká tzv. PN přechod, který má tu vlastnost, že dle typu zapojení jím proud protéká nebo nikoli, protože u polovodiče typu N je vodivost způsobena záporně nabitými elektrony a u typu P je vodivost díky kladně nabitým díram. Je-li PN přechod zapojen bez zdroje napětí (obr. 12a), dojde v místě styku ke spárování elektronů a děr, takže se vytvoří nevodivá oblast bez volných nábojů (hradlová vrstva). Při zapojení v závěrném směru (obr. 12b) se volné náboje vzdalují od místa styku směrem ke zdroji, čímž dojde ke zvětšení hradlové vrstvy a odporu, takže PN přechodem neprochází žádný elektrický proud. Při zapojení v propustném směru (obr. 12c) jsou elektrony přitahovány ke kladnému pólu zdroje a díry k zápornému pólu, takže se hradlová vrstva zúží, poklesne odpor a PN přechodem prochází proud.



Obr. 12 Zapojení PN přechodu [11]

Polovodičové tenzometry využívají piezoodporového jevu, tedy že vodivost PN přechodu se mění v závislosti se silovým působením. Takže je-li na PN přechod přiveden konstantní proud a následně nastane silové zatížení, dojde ke změně procházejícího proudu kvůli rozdílné vodivosti přechodu. Vztah popisující relativní změnu měrného elektrického odporu $\Delta\rho/\rho$ s napětím σ je:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_0 \cdot \sigma \quad (2.2)$$

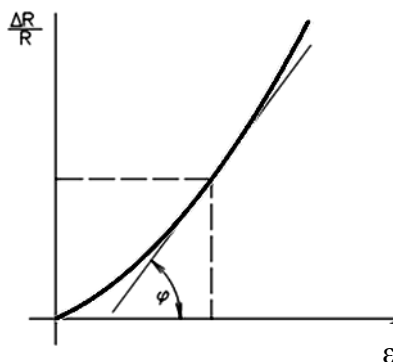
π_0 piezoodporový součinitel [-]

Základním materiálem polovodičových tenzometrů bývá křemík, germanium (základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 2) nebo indium, přičemž monokrystal materiálu je řezán, broušen nebo leptán do tenkých vláken nebo pásků, které jsou následně lepeny na podložku, podobně jako je tomu u odporových tenzometrů. Polovodičové tenzometry jsou tvrdé a křehké (např. křemík má mez pevnosti 3000 MPa a Youngův modul pružnosti v tahu 450 GPa, takže je možné velké zatížení, ale již při poměrně malém natažení materiálu dojde k lomu) a jejich odpor závisí na druhu a počtu příměsí v základním materiálu.

Tabulka č. 2 Základní parametry polovodičových tenzometrů

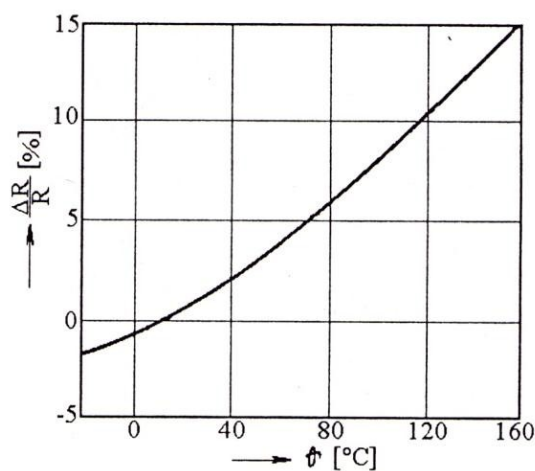
Materiál	Křemík	Křemík	Germanium	Germanium
Typ polovodiče	Typ P	Typ N	Typ P	Typ N
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	0,017-0,02	0,35	1	0,25
Jmenovitý odpor při 20°C [Ω]	100 až 350	100 až 450	50 až 500	-100
Součinitel deformační citlivosti při 20°C	130	-100 až -130	55	-100
Pracovní proud [mA]	20 až 40	10 až 20	10 až 25	5 až 35
Pracovní rozsah poměrných deformací	$\pm 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$

Součinitel deformační citlivosti nelze vyjádřit jako konstantu závislosti poměrné změny odporu na deformaci, protože závislost neprobíhá lineárně. U polovodičových tenzometrů vyjdře k-faktor strmost tečny ke křivce popsané rovnicí pro prodloužení (obr. 13). Pokud jsou zkombinovány oba typy těchto tenzometrů, vznikne takzvaný doplňkový polovodičový tenzometr, jehož hodnota k-faktoru bývá přibližně +240.



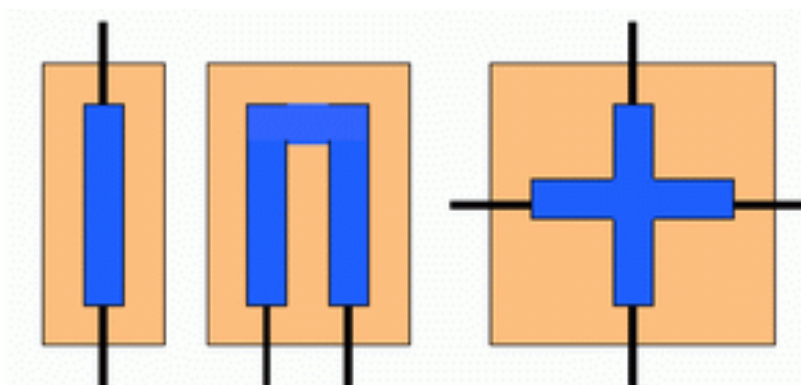
Obr. 13 Deformační charakteristika [12]

Polovodičové tenzometry vykazují značnou teplotní závislost, a proto se teplotní charakteristika vyjadřující změnu deformační citlivosti s teplotou (obr. 14) pro danou sérii tenzometrů experimentálně zjišťuje a hodnota součinitele musí být uvedena v atestu. Vyšší teplotní stability lze dosáhnout především zvýšením počtu příměsí.



Obr. 14 Teplotní charakteristika [1]

Tvarově se polovodičové tenzometry příliš neliší od kovových (obr. 15). Nejjednodušší je tenzometr pro jednoosou napjatost. Dalšími konstrukčními provedeními jsou dvojitý tenzometr, křížový tenzometr, diskový tenzometr a poloviční a úplný můstek.



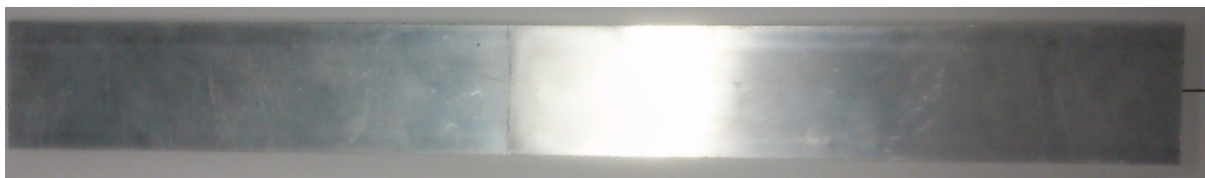
Obr. 15 Základní provedení polovodičových tenzometrů [12]

Významné výhody jsou:

- ✓ vysoká hodnota k-faktoru a možnost jeho volby v širokém pásmu kladných nebo záporných hodnot
- ✓ možnost volby z širokého rozmezí hodnot měrného elektrického odporu aktivní části polovodiče (10^{-2} až $10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$)
- ✓ až do 300°C se křemík deformuje bez měřitelné hystereze
- ✓ možnost konstrukce malých a lehkých snímačů
- ✓ vysoká citlivost a přesnost
- ✓ velký výstupní signal v řádu desítek až stovek mV
- ✓ dlouhá životnost
- ✓ křemíkové materiály mají dobrou odolnost vůči korozi

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měl jsem za úkol vytvořit model vetknutého nosníku s odporovými tenzometry včetně jejich instalace na měřený objekt a provést měření mechanického napětí. Výsledek byl ověřen výpočtem. Byla použita jedna hliníková (obr. 16) a jedna ocelová deska (obr. 17) a na ně byly přilepeny tenzometry do půl-můstku, zatíženy pomocí speciálních desek a bylo provedeno měření.



Obr. 16 Hliníková deska



Obr. 17 Ocelová deska

4.1 Příprava tenzometru před nalepením

Byly použity tenzometry, které měly k-faktor 2.04 a byly s vývody (obr. 18), takže byly potřeba ještě pájecí svorky (obr. 19), které zabrání teplotní dilataci vývodových drátků.

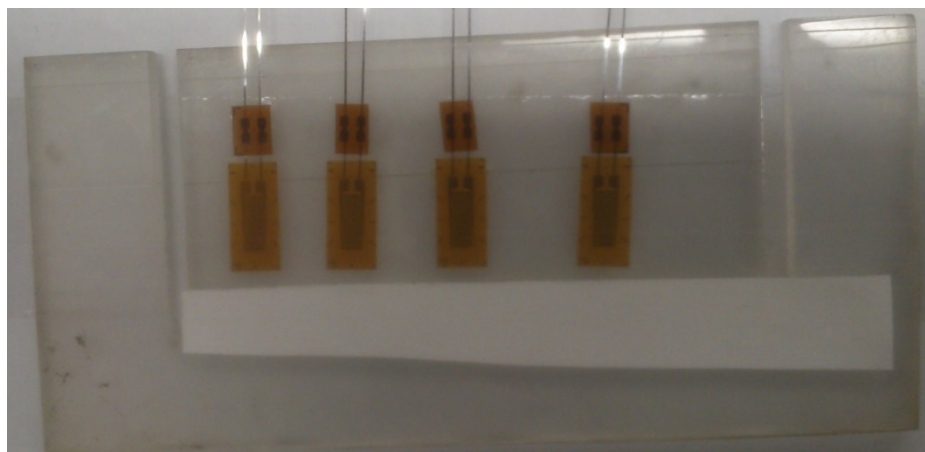


Obr. 18 Tenzometr s vývody



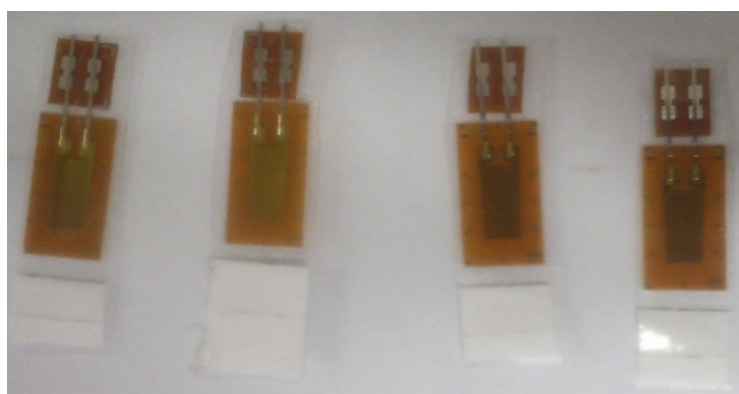
Obr. 19 Pájecí svorky

Nejdříve se na konce plastové destičky přilepila lepicí páska, aby byla docílena rovná lepicí plocha, na kterou se potom pomocí pinzet přesunuly tenzometry opačnou stranou, než kterou se bude lepit tenzometr k povrchu materiálu. Poté se musely nastříhnout pájecí svorky a opět je pomocí pinzet opatrně nanést na vývody tak, aby mezi tenzometrem a pájecí svorkou byla milimetrová mezera kvůli tzv. „omegám“, které jsou nutné proti teplotní dilataci. Jako poslední věc se na lepicí pásku přilepil proužek papíru, aby se tenzometr dobře odděloval od lepicí pásky (obr. 20).



Obr. 20 Nalepení tenzometrů a pájecích svorek k lepicí pásce

Dále se tahle plastová destička odlepila a zůstaly nalepené tenzometry, pájecí svorky a proužek papíru na lepicí pásce. Na ně byla přilepena eurofólie, aby nedošlo k přímému kontaktu tenzometrů nebo pájecích svorek s rukou, protože by mohl být poškozen jejich povrch a nemuselo by se to k materiálu přilepit. Poté byl každý tenzometr zvlášť oddělen nůžkami, aby s nimi bylo možné manipulovat (obr. 21).



Obr. 21 Připravené tenzometry k nalepení

4.2 Příprava materiálu před nalepením

Obě desky se musí před samotným nalepením tenzometru očistit od mastnot, nerovností a dalších nepříjemných vad, protože by potom nemusel tenzometr na povrchu materiálu držet po přilepení. K odmaštění byl použit Cleaner Loctite 7063 (obr. 22). Byl nanesen na kousek papíru a poté aplikován na povrch obou desek.

Dalším krokem bylo vybrousit povrch materiálu v místech, kde bude tenzometr nalepený. Byl použit brusný papír s umělými diamanty se zrnitostí 120, aby byl povrch co nejjemnější (obr. 23).

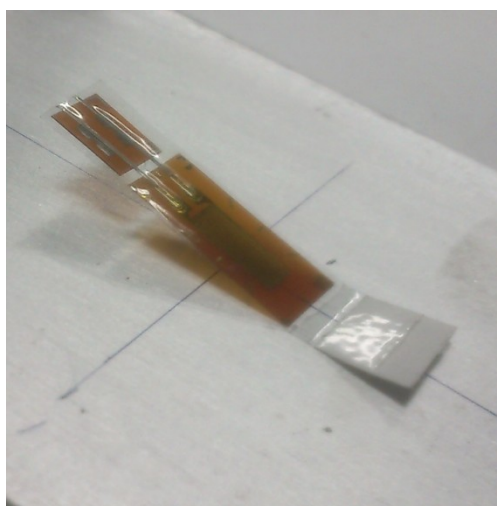


Obr. 23 Brusný papír



Obr. 22 Cleaner Loctite

Z obou stran byl na deskách symetricky načrtnut osový kříž v místech, které byly vybroušeny, a na každý osový kříž byl přesně umístěn tenzometr, který tam držel díky lepicí pásce (obr. 24).



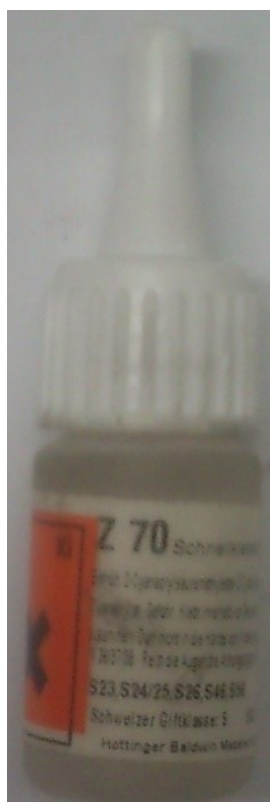
Obr. 24 Tenzometr na osovém kříži

4.3 Nalepení tenzometru k materiálu

Na tenzometr a pájecí svorky byl nanesen speciální katalyzátor 200 Catalyst-C, díky kterému lépe tenzometr přilne k povrchu (obr. 25). Poté byl pomocí pinzet nadzvenut tenzometr a na stykové ploše tenzometru a materiálu byla nanесena malá vrstva lepidla Z 70, které je určeno k lepení kovů s plastickými hmotami (obr. 26). Další kapka tohoto lepidla byla použita také na pájecí svorku a ihned byly přitlačeny všechny složky k povrchu materiálu pěnovou houbou, která byla držena v dlani (obr. 27). Je důležité, aby lepidlo mělo vždy při lepení pokojovou teplotu, protože to také může mít vliv na špatnou přilnavost k povrchu.



Obr. 25 200 Catalyst-C



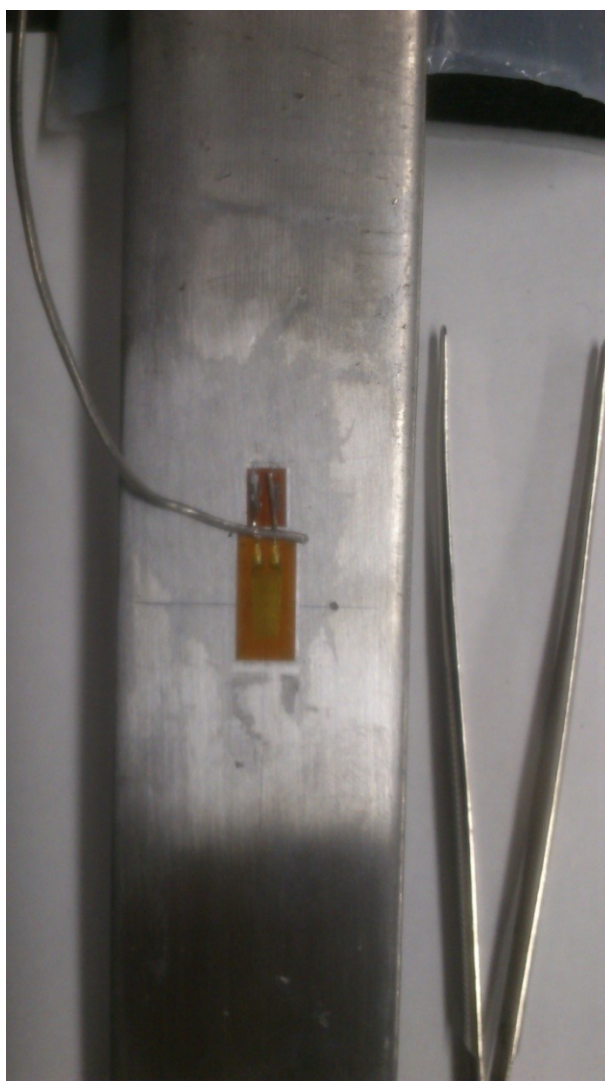
Obr. 26 Lepidlo Z 70



Obr. 27 Pěnová houba

Tenzometr a pájecí svorka byly k materiálu tlačeny asi 2 minuty. To je dostatečná doba na to, aby lepidlo přilnulo, a poté se to musí nechat 5 minut zaschnout. Po uplynutí této doby je možno odlepit lepicí pásku a zkontrolovat, jestli se lepidlo dostalo na celou plochu tenzometru a pájecí svorky. Je důležité, aby při lepení byla v místnosti dostatečná vlhkost a pokojová teplota, jinak se nemusí nalepení povést.

Poslední věc, která se musí provést před pájením u tenzometru s vývody, je vytvoření „omegy“ na drátcích (obloučky ve tvaru Ω) proti teplotní dilataci, protože by mohlo docházet k chybám v měření. Omegy byly vytvořeny pomocí cínového drátu, který byl vložen do mezery mezi tenzometrem a pájecí svorkou, která tam byla při přípravě vytvořena. Takže drátové vývody z tenzometru byly přímo na cínovém drátu. Poté bylo pomocí pinzety přitlačeno na drátové vývody tenzometru, které opsaly obvod cínového drátu (obr. 28). Je důležité, aby se styčné plochy drátových vývodů nedotýkaly povrchu desek, ale byly na pájecí svorce, jinak by nebylo možné změřit napětí a ukazovalo by to chybu.



Obr. 28 Vytvoření omegy na drátových vývodech tenzometru

4.4 Pájení drátových vývodů k pájecím svorkám

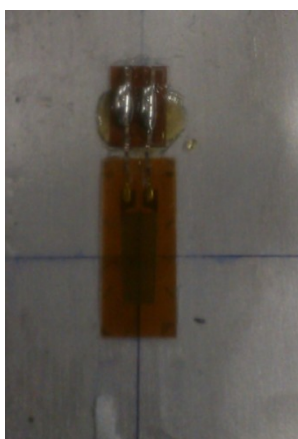
Před samotným pájením byly nanесeny na plošky pájecí svorky speciální pájecí pasta Pro's Kit Solder paste (obr. 29), která plní stejnou funkci jako kalafuna, čili lepší roztékavost a spojení mezi 2 materiály. K zapájení byla použita mikropájka (obr. 30), která byla nastavena na teplotu zhruba 300°C, přiložil se cín a byly zapájeny vývody (obr. 31).



Obr. 29 Pro's Kit Solder paste



Obr. 30 Mikropájka



Obr. 31 Připájené drátové vývody

4.5 Vytvoření závěsného ramena

K vytvoření závěsného ramena byl použit mosazný svařovací drát o délce 200 mm, který byl na konci zahnut do tvaru háčku, na který se potom zavěšovala zátěž. Aby mohl být tento drát namontován k desce, bylo potřeba do ní udělat díru (obr. 32). Konec desky byl rozměřen přesně na místo, kde bude závěsné rameno namontováno. K vyvrtání díry byl použit vrták o průměru 6 mm a sloupová vrtačka VS 20. Aby rameno drželo pevně, tak bylo zeshora přišroubováno svorkovnicí (čokoláda), ze které se odstranil plastový obal (obr. 33).



Obr. 32 Vyvrtaná díra



Obr. 33 Mosazný svařovací drát se svorkovnicí

4.6 Zprovoznění konektoru RJ-50

Použil se NI 9237 (obr. 34), což je modul, který slouží k napájení tenzometrů a měří jejich odpor. Poskytuje připojení pro čtyři půlmůstky nebo celé můstky a zapojují se do něj konektory RJ-50 (obr. 35).

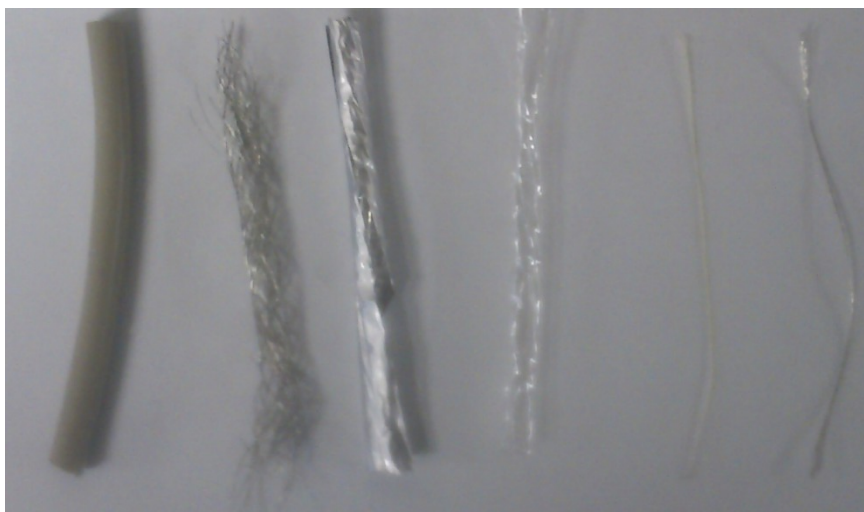


Obr. 34 Zdroj NI 9237



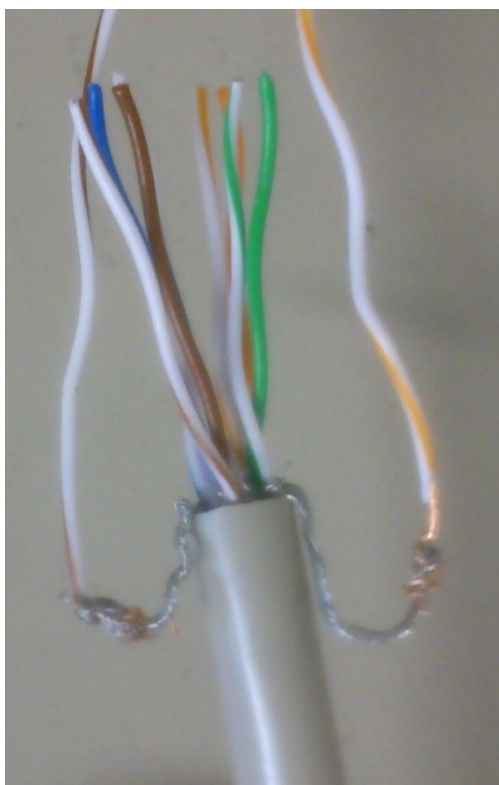
Obr.35 Konektor RJ-50 [13]

Byl použit 8-žilový, stíněný komunikační kabel, který obsahuje několik složek (obr. 36). Vnější část je tvořena PVC pláštěm, pod ním se nachází ochranná hliníková fólie, pod ní je mylarová fólie, vnitřní krytí, bavlněný provázek, lanko a kříž. Všechny tyto části se musely odstranit až na hliníkovou fólii, která se použila na „stínění“ tzn. že potlačuje elektrický šum, který způsobuje rušení signálu, takže signál má potom lepší kvalitu.



Obr. 36 Vnější složky komunikačního kabelu

Složky kabelu, se kterými se dále pracovalo se skládají z 8 měděných drátů pokrytých PE izolací. Na koncích byly nakrouceny na hliníkovou ochrannou síť další 2 měděné dráty, které se nasunuly do prvního a posledního otvoru v konektoru RJ-50, které sloužily jako “stínění” (obr. 37). Ostatních 8 měděných drátů bylo také vloženo do příslušných otvorů konektoru RJ-50 podle určeného pořadí tak, aby po zapojení konektoru do zdroje všechno fungovalo. Následně se konektor s dráty sevknul pomocí krimpovacích kleští (obr. 38). Vyčnívající dráty kabelu se zaizolovaly smršťovací bužírkou, která se smrskne po nahřátí a konektor byl připraven k zapojení.



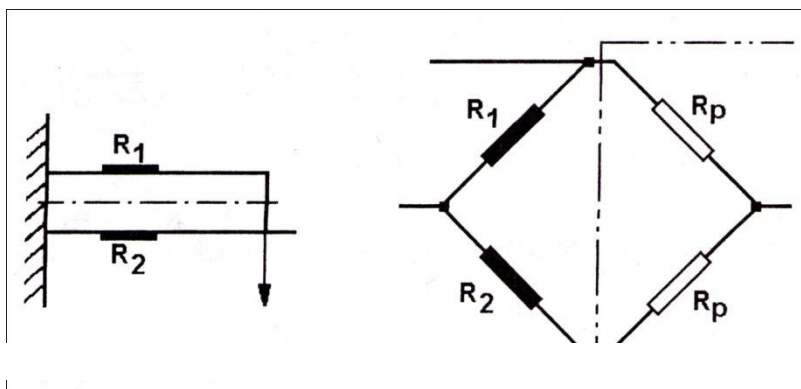
Obr. 37 Připravené měděné dráty



Obr. 38 Krimpovací kleště

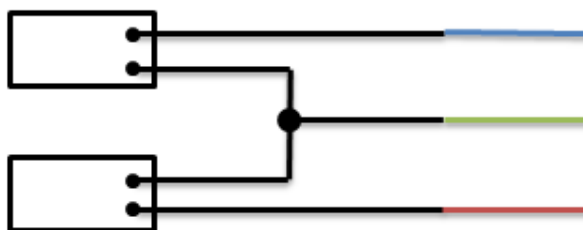
4.7 Zapojení drátů do Wheatstonova půlmůstku [14]

Wheatstonův půlmůstek nebo celý můstek je nejčastější zapojení při statických měřeních. U celého můstku se používají 4 tenzometry, kdežto u půlmůstku 2 tenzometry. Při zatížení ohybem je nejčastěji využíváno zapojení dvou tenzometrů do polovičního mostu (obr. 39). Používá se více tenzometrů, protože přesnost měření je ovlivněná parazitními vlivy, a proto se používá zapojení do můstku s kompenzačním členem teploty.



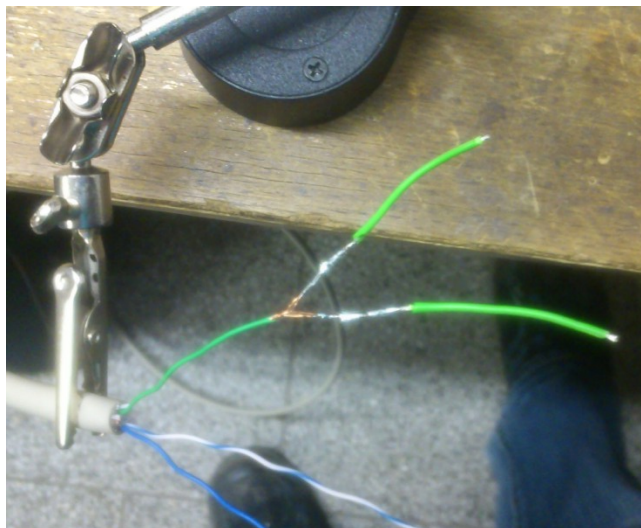
Obr. 39 Zapojení 2 tenzometrů do polovičního mostu [1]

Zapojení drátů do půlmůstku je zobrazeno na schématu (obr. 40). Z 8-žilového, stíněného komunikačního kabelu bylo odstraněno 5 drátů, a zbývající 3 se použily k zapájení na tenzometry. Z 1 drátu se odstranila izolace a rozdělil se na 2 dráty.



Obr. 40 Schéma zapojení drátů do půlmůstku

Na tyto holé měděné dráty se připájely další 2 dráty s izolací (obr. 41) dostatečně dlouhé, aby je bylo možno připájet k tenzometrům z obou stran. Nakonec se pomocí bužírky vytvořila izolace, aby byl drát zpevněn a chráněn.



Obr. 41 Zapájení drátů

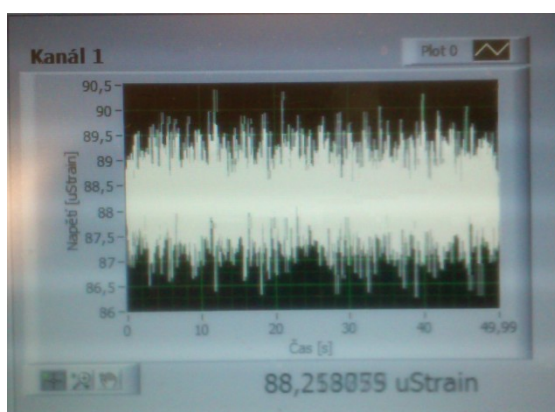
Ze špičky každého drátu byla odstraněna vnější izolace, na konce drátů se nanasla pájecí pasta a mikropájkou byly pocínovány, aby se lépe sloučily s tenzometrem. Po zapájení všech drátů k vývodům na obou tenzometrech byly dráty přilepeny k desce elektroizolační páskou, aby se omezilo poškození nebo utržení drátů během experimentu.

4.8 Provedení experimentu

Aby se obě desky chovaly jako dokonalý vetknutý nosník, tak se z jedné strany zatížily a připevnilly stolařskou svěrkou. Na hliníkové i ocelové desce se provedlo 5 měření. Jako zátěž byly použity destičky, jedna o hmotnosti 220g (obr. 42), které se zavěsily na rameno s háčkem. Při každém měření byla přidána 1 destička, aby byl poznat rozdíl zatížení na hliníkové a ocelové desce. Před samotným měřením se provedla kalibrace a výsledky byly zaznamenány programem, který byl vytvořen v LabView (obr. 43).



Obr. 42 Zavěšené zatěžovací destičky na rameni



Obr. 43 Naměřená hodnota v programu

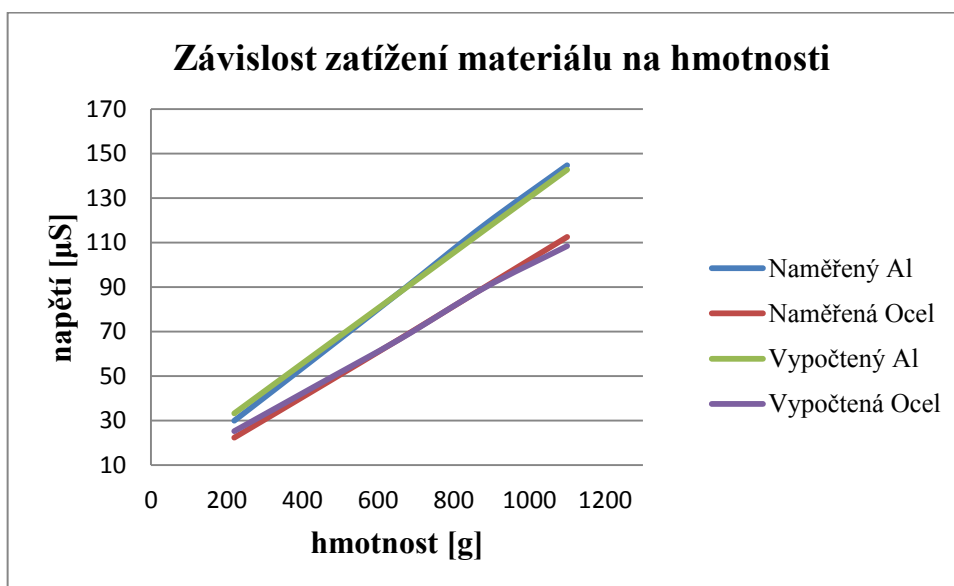
5 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI EXPERIMENTU

Naměřená data byla zaznamenána do tabulky č. 3. Z grafu č. 1 lze vyčíst, že obě desky byly zatěžovány lineárně v závislosti na zatížení a u ocelové desky bylo napětí nižší než u hliníkové desky.

Tabulka č. 3 Naměřené hodnoty

Počet měření	zátěž [g]	Al [μ S]	Ocel [μ S]
1	220	29.9	22.3
2	440	58.8	44.5
3	660	88	66.9
4	880	117.7	89.7
5	1100	144.7	112.5

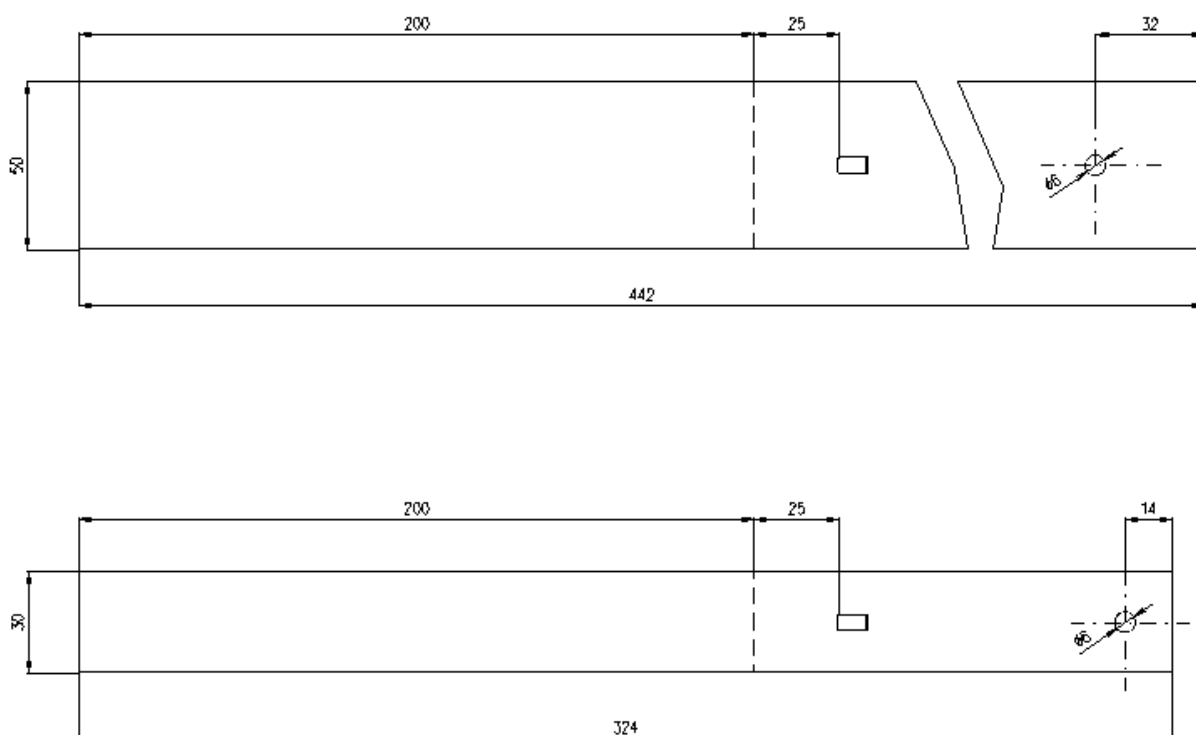
Graf č. 1 Závislost zatíženého materiálu na hmotnosti



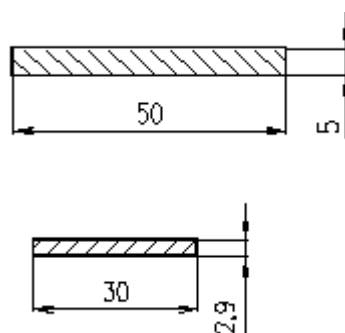
Experiment ukázal, že hliníková deska se při stejném zatížení namáhá mnohem více než ocelová. Je to způsobeno vlastnostmi materiálů a jejich modulem pružnosti. Ocel má 3x větší modul pružnosti, a proto vykazuje menší napětí.

5.1 Veličiny pro výpočet

Ocelová deska měla rozměry $l = 324$ mm, $b = 30$ mm, $h = 2.9$ mm. Měřená část měla délku $l = 85$ mm, protože 200 mm bylo podepřeno, 25 mm od hrany byl umístěn tenzometr a 14 mm od konce desky byla vytvořena díra. Hliníková deska měla rozměry $l = 442$ mm, $b = 50$ mm, $h = 5$ mm. Měřená část měla délku $l = 185$ mm. Opět 200 mm bylo podepřeno, 25 mm od hrany byl umístěn tenzometr a díra byla vytvořena 32 mm od konce desky (obr. 44, 45).



Obr. 44 Zkušební desky



Obr. 45 Průřezové profily zkušebních desek

Závěsné rameno mělo délku $l = 200$ mm, průměr $d = 6$ mm, hustotu mosazi $\rho = 8400$ kg·m⁻³. Hmotnost závěsného ramena byla vypočítána přes vzorec:

$$m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 0.006^2}{4} \cdot 0.2 \cdot 8400 \text{ kg} = 0.047 \text{ kg} \quad (2.3)$$

Vzorec pro výpočet momentu:

$$M_1 = F \cdot l \cdot g [\text{Nm}] \quad (2.4)$$

kde za F byly zadány hodnoty pro zátěž, za l byly zadány měřené délky desek a za g tíhová síla 9.81 m·s⁻².

Vzorec pro výpočet průhybu:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} [\text{mm}^3] \quad (2.5)$$

kde za b byly zadány hodnoty pro šířku desek a za h jejich výška.

Vzorec pro výpočet mechanického napětí:

$$\sigma = \frac{M_1}{W} [\text{MPa}] \quad (2.6)$$

Vzorec pro výpočet relativního prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} [\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.7)$$

kde za E byly zadány hodnoty $2.1 \cdot 10^5$ MPa pro ocelovou desku a pro hliníkovou $0.7 \cdot 10^5$ MPa.

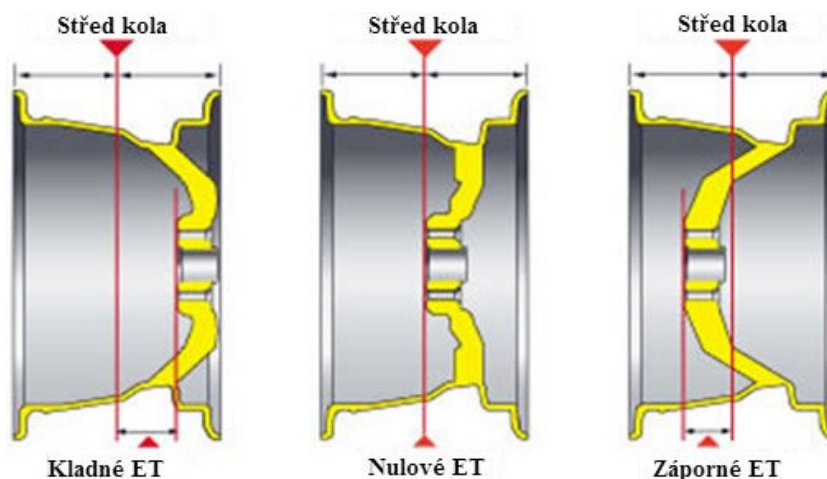
Výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 4. Odchyłky od naměřených hodnot mohou být způsobeny špatným změřením hodnot desek nebo nepřesným nalepením tenzometru.

Tabulka č. 4 Vypočítané hodnoty

Počet měření	zátěž [g]	Al [μS]	Ocel [μS]
1	220	33.2	25.2
2	440	60.6	46
3	660	87.9	66.8
4	880	115.4	89.5
5	1100	142.7	108.4

6 EXPERIMENT ZATÍŽENÍ RAMÍNKA NA NÁPRAVĚ

Cílem bylo zjistit, zda a jak se budou měnit hodnoty zatížení na ramínku nápravy, pokud bude na přední nápravě kolo s rozdílnou hodnotou ET (německy Einpress Tiefe), neboli zálisem. Je to vzdálenost dosedací plochy kola od osy ráfku v milimetrech. Vyšší hodnota ET udává, že kolo je umístěno blíže ke středu vozu a naopak (obr.46).



Obr. 46 Způsoby umístění ET [15]

Na ramínko byly nalepeny tenzometry do půlmůstku (obr. 47) a připojen ke stejnému programu jako v předchozím experimentu. Proběhla 4 měření. Nejdříve se použily pneumatiky Bridgestone ER300 205/55/R16 s hodnotou ET 50 mm. Hodnota 205 udává šířku pneumatiky v mm, 55 značí profil pneumatiky v % šířky a R16 určuje průměr dosedací patice disku v palcích (1 palec = 25.4 mm). Na druhé měření se použily pneumatiky Continental ContiWinterContact 205/45/R17 s hodnotou ET 45 mm. Třetí měření proběhlo na stejných pneumatikách, ale byla přidána podložka o tloušťce $h = 20$ mm. Na poslední měření byly použity pneumatiky Barum Bravuris2 235/35/R19 s hodnotou ET 34 mm.



Obr. 47 Nalepení tenzometrů na ramínko nápravy

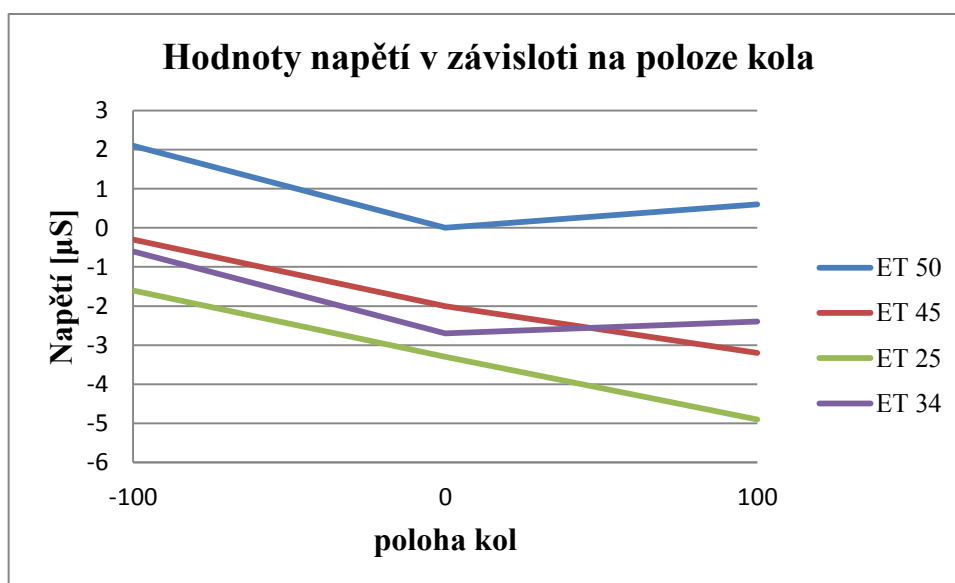
6.1 Výsledné hodnoty experimentu

Na kole s hodnotou ET 50 mm proběhla kalibrace v základním postavení kol a poté se pozorovalo zatížení při maximálním natočení volantu na obě strany. Výsledky experimentu jsou zobrazeny v následující tabulce č. 5 a grafu č. 2.

Tabulka č. 5 Naměřené hodnoty kol

	ET 50 [μS]	ET 45 [μS]	ET 25 (45-20) [μS]	ET 34 [μS]
maximální rejď doprava	0.6	-3.2	-4.9	-2.4
základní postavení kol	0	-2	-3.3	-2.7
maximální rejď doleva	2.1	-0.3	-1.6	-0.6

Graf č. 2 Závislost zatížení kol na poloze

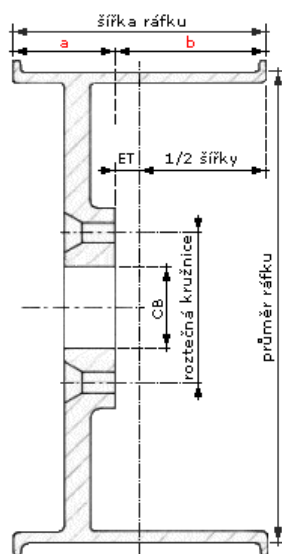


Hodnota -100 značí maximální natočení doleva, 0 základní postavení kol a 100 maximální natočení doprava. Mínusové hodnoty značí, že na ramínko působila tlaková síla, takže čím bylo ET menší (dál od středu středu vozu) tím tam byl vyvinut větší tlak a bylo naměřeno větší napětí.

6.2 Výpočet vzdálenosti vnitřního okraje kola od dosedací plochy

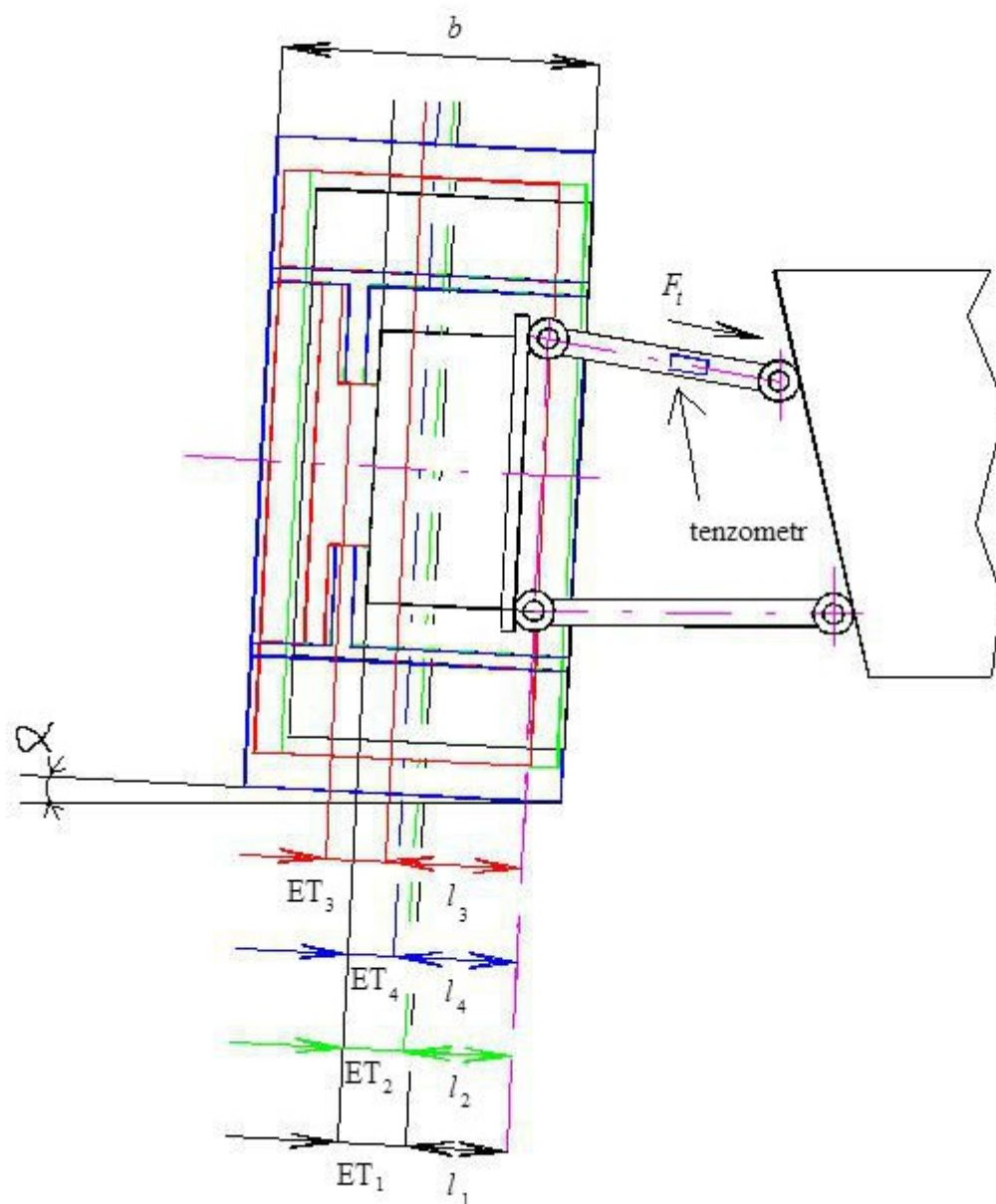
Původní kolo Bridgestone ER300 205/55/R16, ET 50 mm, od kterého začal experiment mělo vzdálenost vnitřního okraje kola od dosedací plochy 152 mm. Druhé testované kolo Continental ContiWinterContact 205/45/R17 mělo vzdálenost 147 mm. Po přidání podložky k druhému kolu se snížila hodnota vnitřního okraje od dosedací plochy na 127 mm a poslední testované kolo Barum Bravuris2 235/35/R19 s hodnotou ET 34 mm mělo 149 mm. K výpočtu byl použit program, který slouží k tomuto účelu (obr. 48).

	šířka ráfku	průměr ráfku	ET	vzdál.vnějšího okraje ráfku od dosedací plochy (a)	rozdíl	vzdál.vnitřního okraje ráfku od dosedací plochy (b)	rozdíl
originální rozměr	8 ▼	16 ▼	50 ▼	52 mm		152 mm	
alternativní rozměr	8 ▼	17 ▼	45 ▼	81 mm	+29 mm	149 mm	-3 mm
Vypočítej							
	šířka ráfku	průměr ráfku	ET	vzdál.vnějšího okraje ráfku od dosedací plochy (a)	rozdíl	vzdál.vnitřního okraje ráfku od dosedací plochy (b)	rozdíl
originální rozměr	8 ▼	16 ▼	50 ▼	52 mm		152 mm	
alternativní rozměr	9 ▼	18 ▼	34 ▼	77 mm	+25 mm	127 mm	-25 mm
Vypočítej							
	šířka ráfku	průměr ráfku	ET	vzdál.vnějšího okraje ráfku od dosedací plochy (a)	rozdíl	vzdál.vnitřního okraje ráfku od dosedací plochy (b)	rozdíl
originální rozměr	8 ▼	16 ▼	50 ▼	52 mm		152 mm	
alternativní rozměr	8 ▼	17 ▼	25 ▼	57 mm	+5 mm	147 mm	-5 mm
Vypočítej							



Obr. 48 Vypočítané hodnoty vzdálenosti vnitřního okraje kola od dosedací plochy se schématem [16], [17]

Z výsledků vyplývá, že čím je vzdálenost vnitřního okraje kola od dosedací plochy menší, tím je nižší napětí, které vzniká na ramínku nápravy. Kola nápravy měla záporný odklon (obr. 49). F_t je tlaková síla působící na horní raménko nápravy. Tato síla vyvolá deformaci, která se změří tenzometrem.



Obr. 49 Schéma nápravy

Vliv na výsledek experimentu má vzdálenost l_1-l_4 (tab. 6). Její velikost záleží na hodnotách ET_1-ET_4 . Čím byla hodnota ET větší, tím je hodnota l menší a tím byla naměřena menší hodnota záporné deformace na tezometru (menší tlak).

Tabulka č. 6 Parametry, které měly vliv na výsledek experimentu

Kolo	b [mm]	ET [mm]	l [mm]	podložka [mm]
Bridgestone ER300	205	50	150	0
ContiWinterContact	205	45	155	0
ContiWinterContact	205	45	175	20
Barum Bravuris2	235	34	166	0

7 ZÁVĚR

Je vysvětlen základní princip odporových tenzometrů pomocí známých fyzikálních vztahů. Dále jsou rozebrány vlivy, které mají negativní dopady na přesnost měření, a způsoby, jak je efektivně kompenzovat. Hlavně změny teploty nejvíce ovlivňují celkovou chybu. Nejlepší metodou kompenzace teplotního vlivu je zapojení do mostu, čímž je dosaženo i zvýšení hodnoty měřeného signálu a v porovnání s ostatními způsoby je nejjednodušší.

Tenzometry jsou děleny na kovové a polovodičové, přičemž každý z druhů má jiné vlastnosti a nachází uplatnění v různých aplikacích. Proto nelze obecně jednoznačně říci, že jeden je lepší než druhý. Kovové tenzometry jsou přesnější a při měření je dosaženo menší chyby. Polovodičové jsou však mnohem citlivější, takže umožňují měřit několikanásobně menší zatížení.

Při měření je velmi důležité připevnění tenzometru na povrchu zkoumaného objektu, protože nedokonalým připevněním dochází k velkým nepřesnostem způsobených špatným přenosem deformace povrchu na snímač. Nejpoužívanější připevňovací metodou je lepení. Na trhu se vyskytuje mnoho druhů lepidel a vzhledem k okolnostem měření je třeba vybrat správný typ. Nejlépe ten, který doporučuje výrobce tenzometru.

Protože jsou měřené deformace malé, také výstupní signály dosahují nízkých hodnot. Pro jejich zesílení se využívá mostového zapojení. Zapojením do můstku a upevněním tenzometrů na měrném členu jsou konstruovány snímače pro různé druhy namáhání.

Experiment ukázal, že hliníková deska se při stejném zatížení namáhá mnohem více než ocelová. Je to způsobeno vlastnostmi materiálů a jejich modulem pružnosti. Ocel má 3x větší modul pružnosti, a proto vykazuje menší napětí.

U druhého experimentu bylo cílem zjistit, zda a jak se budou měnit hodnoty zatížení na ramínku nápravy, pokud bude na přední nápravě kolo s rozdílnou hodnotou ET. Bylo zjištěno, že čím je hodnota ET nižší (kolo je umístěno dál od středu vozu), tím bylo naměřeno větší tlakové napětí.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005, 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
2. JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment*. Skriptum FS, Ediční středisko VUT, 1988, 384 s.
3. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Druhé vydání. Praha: SNTL, 1983, 371 s.
4. Satec. *Vážení a dávkování* [online]. 2012 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.satec.cz/vazeni-a-davkovani>>
5. WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>>
6. DROZD, Zdeněk. *Křivky plastické deformace - technická praxe* [online]. 2005, [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW: <http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/rozsirene/Drozdz/krivky_tech_praxe.html>
7. VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika* [online]. Brno, 2003 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW: <http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium_/opory/Experimentalni_mechanika.pdf>
8. *Proudová hustota* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://elektrotechnika.jex.cz/menu/proudova-hustota>>
9. HRUBANT, Ladislav a Jan HRUBANT. *Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách*. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2004 [cit. 2015-05-04]. ISSN 1210-9592. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>>

10. HUSÁK, Miroslav. *Piezoodporový jev, tenzometry, senzory mechanické deformace* [online]. 2008 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW:

<<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/07%20Piezoodporovy%20jev%20-%20mechanicke%20deformace.pdf>>

11. KUSALA, Jaroslav. *Elektrina: Polovodiče - fyzikální základy* [online]. 2003, [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW:

<<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>>

12. VOJÁČEK, Antonín. *Polovodičové tenzometry - princip, provedení, použití, historie.* [online]. 2006 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z WWW:

<<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART288-polovodicove-tenzometry--princip-provedeni-pouziti-historie.html>>

13. *CONNECTOR RJ50 10 Pin* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW:

<http://trungtien_226.webmienphi.in/ct/chi-tiet/73/connector-rj50-10-pin.html>

14. Hoffman, K. *An Introduction to Measurements using Strain gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989

15. *Rozměry disků* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW:

<<http://www.bmwklub.sk/bmw3-e36/e36-325-tds-rozmary-diskov-t66301-15.html>>

16. *Výpočet hodnot alternativních rozměrů alu ráfků* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.e-pneu.cz/rozmary_alu.php>

17. *Schéma ráfku* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.e-pneu.cz/tech_podpora.php>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady použití tenzometrů.....	7
Obr. 2 Deformační křivka.....	8
Obr. 3 Deformace při zatížení.....	8
Obr. 4 Schéma vodiče.....	8
Obr. 5 Hystereze.....	11
Obr. 6 Vliv creepu na měření.....	12
Obr. 7 Graf únavy cyklickým zatěžováním.....	13
Obr. 8 Rozdělení tenzometrů.....	14
Obr. 9 Provedení lepeného tenzometru.....	15
Obr. 10 Základní typy fóliových tenzometrů.....	16
Obr. 11 Krystalová mřížka polovodiče.....	17
Obr. 12 Zapojení PN přechodu.....	18
Obr. 13 Deformační charakteristika.....	19
Obr. 14 Teplotní charakteristika.....	20
Obr. 15 Základní provedení polovodičových tenzometrů.....	20
Obr. 16 Hliníková deska.....	22
Obr. 17 Ocelová deska.....	22
Obr. 18 Tenzometr s vývody.....	22
Obr. 19 Pájecí svorky.....	22
Obr. 20 Nalepení tenzometrů a pájecích svorek k lepící pásce.....	23
Obr. 21 Připravené tenzometry k nalepení.....	23
Obr. 22 Cleaner Loctite.....	24
Obr. 23 Brusný papír.....	24
Obr. 24 Tenzometr na osovém křížci.....	24
Obr. 25 200 Catalyst-C.....	25
Obr. 26 Lepidlo Z 70.....	25
Obr. 27 Pěnová houba.....	25
Obr. 28 Vytvoření omegy na drátových vývodech tenzometru.....	26

Obr. 29 Pro's Kit Solder paste.....	27
Obr. 30 Mikropájka.....	27
Obr. 31 Připájené drátové vývody.....	27
Obr. 32 Vyvrtaná díra.....	28
Obr. 33 Mosazný svařovací drát se svorkovnicí.....	28
Obr. 34 Zdroj NI 9237.....	29
Obr.35 Konektor RJ-50.....	29
Obr. 36 Vnější složky komunikačního kabelu.....	29
Obr. 37 Připravené měděné dráty.....	30
Obr. 38 Krimpovací kleště.....	30
Obr. 39 Zapojení 2 tenzometrů do polovičního mostu.....	31
Obr. 40 Schéma zapojení drátů do půlmůstku.....	31
Obr. 41 Zapájení drátů.....	32
Obr. 42 Zavěšené zatěžovací destičky na rameni.....	33
Obr. 43 Naměřená hodnota v program.....	33
Obr. 44 Zkušební desky.....	35
Obr. 45 Průřezové profily zkušebních desek.....	35
Obr. 46 Způsoby umístění ET.....	37
Obr. 47 Nalepení tenzometrů na ramínko nápravy.....	37
Obr. 48 Vypočítané hodnoty vzdálenosti vnitřního okraje kola od dosedací plochy se schématem.....	39
Obr. 49 Schéma nápravy.....	40